

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ КОНДЕНСАЦИИ ЭКСИТОНОВ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ КАПЛИ В ГЕРМАНИИ

И.М.Фишман

Предложен метод измерения скорости конденсации в зависимости от степени пересыщения экситонного газа. Результаты согласуются с классической теорией при малой и отклоняются от нее — при большой степени пересыщения.

В [1] был обнаружен своеобразный гистерезисный эффект воздействия СВЧ поля на систему экситоны — ЭДК в германии. Если образец облучать СВЧ излучением после того, как в нем уже созданы капли,

то интенсивность люминесценции ЭДК слегка возрастает из-за увеличения потока электронов и дырок, прилипающих к каплям. Если же постепенно увеличивать темп генерации G , когда СВЧ поле включено, то порог конденсации экситонов достигается при большем темпе генерации, так как СВЧ поле, разогревая свободные носители, смещает равновесие в системе экситонов, электронов и дырок. Таким образом, имеется диапазон уровней возбуждения, в котором греющее поле слабо влияет на сформировавшиеся капли, но новые капли при этом возникать не могут. На этом эффекте основан предлагаемый метод определения скорости конденсации.

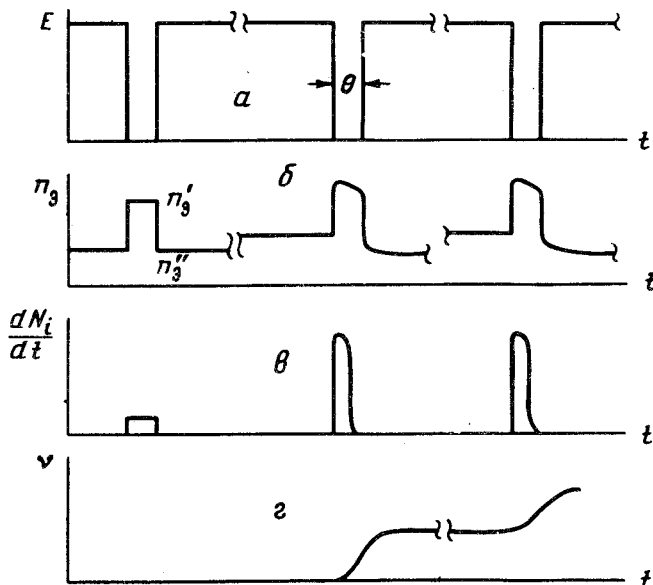


Рис. 1. a — Зависимость напряженности СВЧ поля от времени. θ — длительность импульса выключения СВЧ поля. b — Изменение концентрации экситонов при медленном возрастании темпа генерации: n_3' — концентрация экситонов в "холодной" системе n_3'' — концентрация экситонов в присутствии СВЧ поля. θ, z — Временная зависимость скорости конденсации dN_i/dt и полной концентрации конденсированной фазы $\nu = \frac{4\pi}{3} n_0 N_i R^3$

Пока в образце капель нет, свободные носители генерируются светом и связываются в экситоны: $G = (n_3/\tau_3) + (n/\tau)$, причем соотношение между n_3 и n определяется коэффициентом связывания свободных носителей в экситоны, зависящим от температуры носителей, т.е. от величины напряженности СВЧ поля. В греющем поле концентрация свободных носителей возрастает, а экситонов — падает. Пусть на образец подается последовательность импульсов выключения СВЧ поля длительностью θ , и при этом медленно увеличивается интенсивность возбуждающего света (рис. 1). Как видно из рис. 1, a, b , в каждом импульсе система на время θ возвращается в "холодное" состояние. При возрастании

нии G достигается такой момент, когда за время θ возникает зародыш ЭДК и, если длительность импульса достаточно велика, он успевает вырасти до макроскопического размера. Тогда после выключения импульса капля останется в кристалле, а новые зародыши возникнуть не могут до прихода следующего импульса (рис.1, ϵ, ζ). Чем больше θ , тем при меньшем G должна начинаться конденсация. Поскольку порог появления излучения соответствует тому, что в кристалле за время θ возник хотя бы один жизнеспособный зародыш, величина θ^{-1} имеет смысл минимальной скорости конденсации при данной степени пересыщения; поэтому, измеряя зависимость пороговой накачки G_+ от длительности импульса, можно определить связь между скоростью конденсации $dN_i/dt \sim 1/\theta$ и степенью пересыщения [2,3].

В эксперименте использовались образцы чистого n -Ge ($N_d N_a \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$)¹⁾, которые помещались в короткозамкнутый отрезок волновода 8-мм диапазона [1]. Выключение СВЧ мощности осуществлялось импульсами длительностью $10^{-8} \div 10^{-7}$ сек, подаваемыми на катод клистрона.

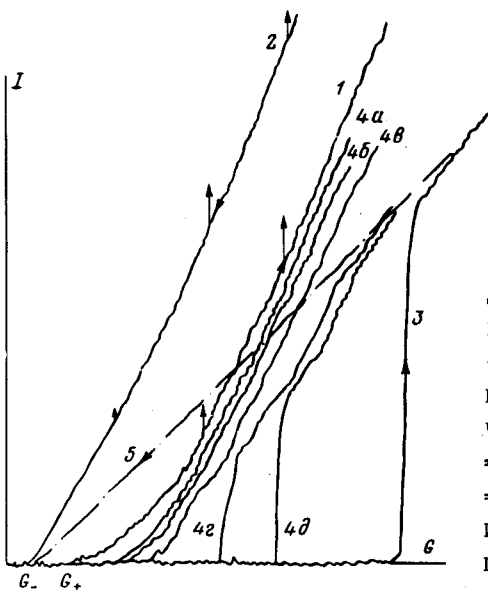


Рис 2 Зависимость интенсивности излучения ЭДК от темпа генерации G : 1,2 — прямая и обратная ветви гистерезиса в отсутствие СВЧ поля, G_+ — порог восходящей, G_- — нисходящей ветви; 3,5 — то же при напряженности СВЧ поля $E \approx 3 \text{ В/см}$; 4 — восходящая ветвь при $E \approx 3 \text{ В/см}$ и изменении длительности импульсов выключения поля θ : а — $\theta = 10^{-8}$ сек, б — $\theta = 10^{-4}$ сек, в — $\theta = 10^{-5}$ сек, г — $\theta = 10^{-6}$ сек, д — $\theta = 4 \cdot 10^{-7}$ сек; частота повторения импульсов — 0,5 гц, время записи одной кривой ~ 5 мин

Результаты эксперимента показаны на рис.2. Кривые 1 и 2 — восходящая и нисходящая ветви гистерезисной зависимости интенсивности излучения каплей $I(G)$ в отсутствие СВЧ поля. Вертикальные отрезки на кривых 1,2 показывают, как возрастает интенсивность излучения ЭДК при увеличении напряженности поля E до $\sim 5 \text{ В/см}$. Кривые 4а — д записаны при $E \approx 3 \text{ В/см}$ и различной длительности импульсов выключения СВЧ поля. Гистерезис излучения ЭДК в СВЧ поле ($\theta = 0$)

¹⁾ Автор весьма признателен Е.Халлеру (Lawrence Berkeley Lab., USA) за предоставление образца германия.

представлен кривыми 3, 5. Видно, что при уменьшении θ от 10^{-3} до 10^{-5} сек порог возникновения ЭДК постепенно увеличивается; вблизи порога концентрация экситонов оказывается достаточной для того, чтобы за время θ возникла одна или несколько капель, и каждый следующий импульс снимает то небольшое пересыщение, которое возникает в образце за счет увеличения G в промежутке между импульсами.

Поскольку пороговая концентрация экситонов в "холодной" системе $n_{Эmin}$ пропорциональна темпу генерации G , можно определить зависимость θ от степени пересыщения. Известно, что в классической модели [2, 3] скорость конденсации экспоненциально сильно зависит от степени пересыщения

$$\frac{dN_i}{dt} = A \exp \left(- \frac{\Lambda(T)}{\ln^2 n_Э/n_{T\infty}} \right);$$

поэтому удобно представить полученные данные в координатах $\ln \theta^{-1} = f(\ln^{-2} n_Э/n_{T\infty})$ (рис.3). Степень пересыщения $n_Э/n_{T\infty}$ определялась из отношения G_+/G_- (рис.2) с учетом того, что G_- соответствует $n_{Эmin}$ — минимальной концентрации экситонов, совместимой с существованием капель радиуса R_{min} при данной температуре; отношение $n_{Эmin}/n_{T\infty}$ определялось по известным формулам работ [2, 3]. Кривые 1 и 2 рис.3 относятся к температурам 1,53 и 1,85 К, соответственно. Видно, что точки, соответствующие малым пересыщениям (большим θ), хорошо описываются прямыми $\theta^{-1} = A - (\Lambda(T) / \ln^2 n_Э/n_{T\infty})$; наклон этих прямых определяет величину коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = (2,3 \div 2,6) \cdot 10^{-4} \text{ э} \cdot \text{см}^{-2}$, что хорошо согласуется с другими измерениями [4].

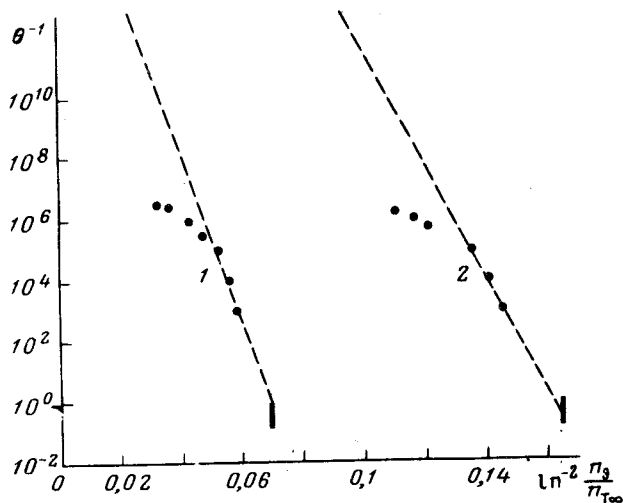


Рис.3. Зависимость скорости конденсации $dN_i/dt \approx \theta^{-1}$ от степени пересыщения: 1 — $T = 1,53 \text{ К}$; 2 — $T = 1,85 \text{ К}$

Точки пересечения прямых рис.3 с осью ординат определяют величину предэкспоненциального множителя в (1): при 1,5 К $A \approx 10^{20} \text{ сек}^{-1}$; эта величина может быть согласована с теорией [2, 3] при двух различных предположениях: а) если зародыши возникают на примесных цент-

рах с энергией связи ~ 1 МэВ, то концентрация центров должна быть $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$; б) если конденсация гомогенна [3], то величина A определяется плотностью состояний D "газа критических зародышей":

$$D = \left(\frac{\nu n^2 kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}, \quad \nu - \text{число частиц в критическом зародыше.}$$

Начиная с $\theta \lesssim 10^{-6}$ сек, порог конденсации резко растет с укорочением импульса, и зависимость $\theta^{-1} = f(\ln^{-2} \frac{n_3}{n_{T,\infty}})$ отклоняется от

теоретической. При этом появляются скачки интенсивности излучения ЭДК вблизи порога конденсации (такое же скачкообразное изменение интенсивности излучения, свидетельствующее о быстром и одновременном возникновении большого числа зародышей, наблюдается при стационарно включенном СВЧ поле¹⁾).

Физический смысл этого эффекта (его подробное обсуждение выходит за рамки краткого сообщения) состоит в том, что среднее число экситонов, сталкивающихся с центром в течение малого промежутка времени, недостаточно для образования критического зародыша. Иными словами, необходимо, чтобы произведение $n_3\theta$ достигло некоторой определенной величины δ . При этом, поскольку скорость конденсации возрастает очень быстро с увеличением n_3 , к тому моменту, когда условие $n_3\theta > \delta$ будет выполнено, число одновременно образующихся зародышей окажется очень большим.

Автор благодарен Б.М.Ашкинадзе за плодотворные обсуждения и помощь в работе.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 октября 1978 г.

Литература

- [1] Б.М.Ашкинадзе, И.М.Фишман. ФТТ, **20**, 1071, 1978.
- [2] В.С.Багаев, Н.В.Замковец, Л.В.Келдыш, И.Н.Сибельдин, В.А.Цветков. ЖЭТФ, **70**, 1501, 1976.
- [3] R.M. Westervelt. Phys. Stat. Sol. (b), **74**, 727, 1976.
- [4] Y.C.Hensel, T.G.Phillips, G.A.Thomas. Sol. State Phys., **32**, 1977.

¹⁾Отметим, что оптический гистерезис явления конденсации в СВЧ поле резко увеличивается, так как порог нисходящей ветви G_- не изменяется. Отношение G_+/G_- может достигать величины $20 \div 50$.